

O EMPREGO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) NO CONTROLE DE QUALIDADE DE ROCHAS ORNAMENTAIS EXTRAÍDAS EM TERRENOS INTEMPERIZADOS

Marco Antonio Barsottelli Botelho^{1*} e Everaldo Moura Araújo^{2*}

¹Professor Adjunto, CPGG/UFBA. E-mail: botelho@ufba.cpgg.ufba.br

²Doutorando, UFBA

*UFBA - R. Augusto Viana, s/n – Canela – 40.110-060 – Salvador – BA

RESUMO

Uma das tecnologias mais modernas e eficientes para realizar a prospecção e o controle de qualidade de rochas ornamentais é o método geofísico do Radar de Penetração no Solo (GPR), entretanto esta tecnologia sofre fortes restrições quando aplicada em terrenos eletricamente condutivos. O emprego do GPR para mapear o manto de intemperismo sobre um maciço rochoso, e para analisar, ou mesmo, localizar matacões imersos num manto de regolito, nem sempre é bem sucedida. Esta falha do GPR deve-se ao fato de que muitos destes terrenos são argilosos, e úmidos, apresentando condutividades superiores a 250 mS/m, o que causa atenuações superiores a 100 dB/m durante a propagação do pulso de radar.

O emprego do GPR na prospecção e controle de qualidade de matacões de sienito, nos arredores da cidade de Uruçuca, localizada na porção sudeste oriental do Estado da Bahia, na denominada microrregião Cacaueira, apresentou um desempenho muito discreto. A área foi estudada empregando antenas de 40 e 80 MHz, porém o solo da área apresenta condutividades elétricas variáveis entre 150 e 300 mS/m, os quais causaram grande absorção nas reflexões dos pulsos de radar. A maioria dos radargramas usados na prospecção tem uma ausência de reflexões provenientes do subsolo, e para complicar, apresenta muitas difrações provenientes do arvoredo da área. Entretanto, quando um matacão é localizado e remove-se o solo sobre a face superior do corpo encontrado, pode-se usar o GPR para analisar os limites, a espessura e a presença ou não de fraturas na rocha. O GPR revela-se uma excelente ferramenta no diagnóstico da viabilidade econômica do corpo, auxilia na cubagem dos matacões e contribui para diminuir despesas com tentativas de lavras em corpos fraturados, contribuindo também para diminuir o impacto ambiental.

INTRODUÇÃO

A exportação de rochas ornamentais no Brasil vem sustentando uma taxa de crescimento de 10 % ao ano desde 1987 até o fim desta década. As rochas ornamentais representam um dos três segmentos mais atrativos da mineração no Brasil para o investidor estrangeiro, sendo superado apenas pelo do ouro e seguido pelo setor das pedras preciosas. O citado crescimento reflete uma crescente demanda por granitos e mármore nos países desenvolvidos, onde são usados no

revestimento de fachadas de prédios, na decoração de interiores e até na indústria de móveis.

Os granitos brasileiros são muito apreciados no mercado internacional pelas suas características físicas e principalmente pela variedade de cores disponíveis, onde o exemplo mais nobre é o "Azul Bahia", um raro sienito com coloração azul marinho e com alto valor de mercado, para se ter uma idéia mais precisa sobre seu valor basta acrescentar que ele é vendido em kg ou m², mas nunca em tonelada, como são todas as outras rochas ornamentais.

A despeito das grandes reservas e da imensa variedade de novas rochas, o Brasil ocupa o quarto lugar no "ranking" mundial de exportadores, correspondendo a somente 5% do volume total comercializado no mundo. Este quadro é ainda pior quando observamos que a nossa produção é exportada sem beneficiamento, em blocos brutos e não em produtos beneficiados.

No Brasil existe uma demanda por tecnologias que diminuam os custos da extração, realizem controle de qualidade rigoroso do material a ser extraído e permitam realizar bons acabamentos nos blocos, para que se possa diminuir custos com a extração e ganhe em qualidade para aceitação pelo mercado internacional. A título de ilustração, o Brasil explora 60% de sua produção de mineral para a Itália, onde o beneficiamento agrega valor ao material que é exportado novamente, agora beneficiado.

Este trabalho vai focar sua atenção nos fatores que contribuem para o desperdício de recurso e perda de material durante a fase de extração ou beneficiamento das rochas ornamentais, particularmente, rochas que foram alvos de intemperização, as quais são muito comuns em nosso país tropical. Os alvos escolhidos para esta pesquisa foram granitos intemperizados extraídos na forma de matacão.

A metodologia que apresentamos neste trabalho é o emprego de Radar de Penetração de Solo (*Ground Penetrating Radar*) ou GPR na detecção de estruturas internas que possam influenciar a frente de lavra ou afetar o volume e a qualidade do material a ser extraído. Vejamos alguns exemplos: (i) no caso dos matacões de rochas ígneas, a presença de fraturas pode dimensionar as alturas das bancadas para extração dos blocos ou mesmo inviabilizar a mineração sobre o referido bloco; (ii) a metodologia foi analisada quanto a sua capacidade para localizar os matacões enterrados em materiais altamente intemperizados.

Foram obtidas outras informações sobre a sub-superfície, fornecidas pelo método de GPR, quando aplicado sobre áreas do material intemperizado contendo matações, como por exemplo, as hipérbolas provenientes da difração da onda eletromagnética nos corpos enterrados, as quais nos fornecem a velocidade do material intemperizado ($v=0,08\text{m/ns}$), bem como as reflexões revelam seus contornos definindo em sub-superfície a sua posição espacial.

Os radargramas podem ser migrados em profundidade empregando as velocidades obtidas a partir das análises de velocidade por ajuste das hipérbolas difratoras, e assim as reflexões são posicionadas em suas verdadeiras posições na sub-superfície.

A técnica de migração utilizada nesta pesquisa é a Migração Reversa no Tempo (*Reverse Time Migration*), com a equação 2D escalar da onda, usando operadores de diferenças finitas com aproximação de quarta ordem para as derivadas espaciais e de segunda ordem para as derivadas em tempo. Esta técnica de migração foi criada nos trabalhos de Loewenthal e Mufti (1983) e Baysal *et al* (1983) e foi aplicada em radargramas registrados sobre terrenos carbonáticos em Botelho e Mufti (1998). Uma boa revisão sobre técnicas de migração pode ser encontrada em Loewenthal *et al* (1976), Faria (1986) e Yilmaz (1987).

Existem alguns aspectos práticos que devem inspirar cuidados no levantamento com GPR em regiões de matações aflorantes e/ou com vegetação de grande porte (árvores com mais de 5m de altura). É necessário muita atenção na identificação de reflexões laterais que se sobrepõem às informações de sub-superfície. Estes eventos são discernidos, quando associados a hipérbolas de difração, por suas velocidades de $v=0,30\text{m/ns}$, que corresponde à velocidade de propagação no ar, indicando sua origem em obstáculos (troncos ou árvores) na superfície do terreno.

O Método do Radar Penetrante no Solo (GPR)

Esta técnica geofísica é caracterizada principalmente pelo alto poder de resolução que lhe permite extrair informações bastante precisas da sub-superfície de forma rápida e econômica, podendo, inclusive, alcançar uma profundidade de penetração de até 50m, em materiais cuja condutividade não ultrapassa o valor de 1mS.m^{-1} .

Vale salientar também a enorme semelhança que esta técnica guarda com o método de reflexão sísmica no que diz respeito, não só aos princípios de funcionamento físico, cuja idéia fundamental está no uso da propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência, como também nos aspectos de aquisição e processamento de dados de radar. Todas essas características supramencionadas lhe asseguram o mesmo grau de qualidade conferido ao método sísmico de reflexão.

O emprego das técnicas de GPR no estudo de fraturas em rochas cristalinas pode ser encontrado

nos trabalhos de Friedel *et a.* (1991), Botelho e Araújo(1996), Grasmueck (1996) e no de Grandjean and Gouny (1996); na detecção de cavernas e estruturas de dissolução encontramos nos trabalhos de Robert e Bosset (1994), Botelho *et al.* (1996), Sigurdsson e Overgaard (1998) e em Botelho e Mufti (1998).

Princípios físicos

A técnica de radar penetrante no solo (GPR) apresenta muitas semelhanças com o método sísmico de reflexão. Os pulsos eletromagnéticos de alta frequência (10-1000MHz) são emitidos pela antena transmissora do radar e se propagam na terra de tal forma que, ao encontrar uma descontinuidade elétrica, isto é, uma interface, parte do sinal será refletido e parte transmitido.

A propagação do sinal de radar depende das propriedades elétricas do meio, que são controladas pelo tipo de rocha e, principalmente, pela quantidade de água presente no solo e nas fraturas de rochas. Medindo-se o tempo que o pulso leva para atingir o refletor e retornar à antena receptora, podemos determinar a posição espacial do refletor, desde que saibamos a velocidade de propagação do pulso. Neste e em outros aspectos, tais como aquisição, amostragem e processamento de dados, o GPR guarda uma enorme semelhança com o método sísmico de reflexão. Excelentes estudos sobre a teoria eletromagnética podem ser encontrados em Stratton (1941) ou Hauser (1970), entretanto o trabalho de Parasnis (1996) faz uma abrangente revisão sobre os métodos geofísicos, incluindo os elétricos e eletromagnéticos, particularmente o GPR.

Constante de fase e fator de atenuação

Os fatores que descrevem a propagação das ondas eletromagnéticas na terra são a velocidade e o fator de atenuação. As equações que descrevem esses fatores são bem conhecidas (Stratton, 1941). Para ondas planas e em meios de baixa perda, os campos elétrico, E, e magnético, H, podem ser descritos pelas equações,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp(\omega t - kx) \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 \exp(\omega t - kx) \quad (2)$$

onde o fator complexo, k, é conhecido como a constante de propagação,

$$k = \alpha + i\beta \quad (3)$$

e os parâmetros *alpha* e *beta* representam a constante de fase e o fator de atenuação, respectivamente.

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} \right) + 1 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\epsilon^2 \omega^2}} \right) - 1 \right]^{1/2} \quad (5)$$

Os parâmetros constitutivos, σ e ϵ , representam, respectivamente, a condutividade e a permissividade elétricas. A permeabilidade magnética para a maioria das rochas não magnéticas, possui valor igual àquele atribuído a essa constante no espaço livre ($=1$).

Velocidade de fase

A velocidade de fase, v , que representa a velocidade de propagação da fase de uma onda ou sinal propagado, é o outro parâmetro que descreve a propagação das ondas eletromagnéticas. Esta velocidade é obtida tomando o argumento do cosseno em (1) ou (2),

$$\phi = \omega - kx \quad (6)$$

que se chama onda de fase.

Se acompanharmos o deslocamento com o tempo de um ponto onde a fase é constante, ou seja, teremos derivando (6) em relação ao tempo

$$\frac{d\phi}{dt} = \omega - k \frac{dx}{dt} = 0 \quad (7)$$

ou

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad (8)$$

Em um meio não condutivo, este parâmetro é expresso por:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k_e k_m}} \quad (9)$$

onde $k_e = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ e $k_m = \frac{\mu}{\mu_0}$ representam,

respectivamente, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética relativas; e $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ é a velocidade da luz no espaço livre. Para a maioria das rochas não magnéticas, conforme foi mencionado acima, a permeabilidade elétrica relativa, k_m , possui valor unitário e a expressão acima se reduz a

$$v = \frac{c}{k_e} \quad (10)$$

Nesse caso, Davis e Annan (1989) apresentam um conjunto de valores para a permissividade elétrica relativa e também para a

velocidade de propagação das ondas em vários tipos de materiais geológicos. Em nossa pesquisa o material intemperizado e argiloso que envolve os corpos de matacões apresentam velocidades de 0,06 a 0,08m/ns compatíveis às constantes dielétricas na faixa de 15 a 25. A rocha dura do matacão, ou seja, o sienito apresenta velocidade de propagação de 0,95 a 0,15m/ns, o que corresponde a aproximadamente a uma constante dielétrica de 5 a 11.

Coefficiente de reflexão

Ao encontrar uma interface entre dois meios de impedâncias distintas, a onda eletromagnética é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. Essa impedância que o meio oferece à passagem da onda eletromagnética é estabelecida pela equação seguinte:

$$Z = \frac{c}{\sqrt{k_e}} \quad (11)$$

de forma que a impedância é uma quantidade complexa, em função de o número de onda, k , também o ser.

Sejam \mathbf{E}_r e \mathbf{E}_i os campos elétricos refletidos e incidentes, respectivamente, e considerando normal a incidência das ondas eletromagnéticas transmitidas pelo sistema GPR, o coeficiente de reflexão, $\mathbf{E}_r/\mathbf{E}_i$, é expresso por:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (12)$$

onde os índices 1 e 2 referem-se aos dois meios separados pela interface.

A incidência normal implica que uma mesma antena é utilizada para transmissão e recepção dos sinais. No entanto, se considerarmos um pequeno afastamento entre as antenas transmissora e receptora com relação à interface, a incidência pode ser considerada normal. Num meio não magnético e de condutividade nula, o coeficiente de reflexão será:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}} \quad (13)$$

considerando o contraste entre a constante dielétrica do material intemperizado (em torno de 20) e do matacão (aproximadamente 8), é de se esperar que ocorram excelentes refletores nos contatos rocha-solo.

Os matacões de sienito de Uruçuca.

A cidade de Uruçuca está localizada no nordeste oriental do estado da Bahia, especificamente na denominada microrregião cacauera, limitada pelos meridianos 39° 00' e 39° 30' de longitude oeste e pelos paralelos 14° 30' e 15° 00' de latitude sul (ver figura 01).

No mapa topográfico da figura (02) podemos observar o traçado da estrada e o posicionamento de alguns perfis de GPR levantados ao longo da mesma e sobre os afloramentos dos corpos de matacões.

Os perfis de radar foram levantados com espaçamento horizontal (Dx) entre os traços de 0,1 m, uma taxa de amostragem (Dt) de 1 ns e o tempo total (NT) dos "scans" 512ns.

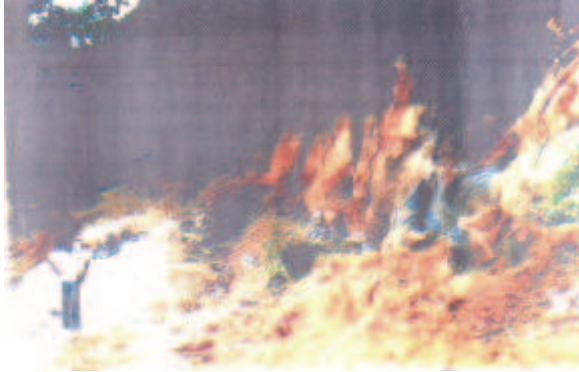


Figura 03: Vista parcial do afloramento de baixo onde foi levantado o radargrama



Figura 04: Vista parcial de um dos afloramentos da porção mais alta da área. Podemos observar o contato lateral entre a rocha alterada (esquerda) e o matacão sobre o qual estão algumas pessoas em pé.

A figura 05 mostra o radargrama 659 filtrado (corta baixa em 15MHz) de um perfil levantado sobre um matacão aflorante, onde podemos observar um deslocamento sub-horizontal na superfície e planos de fraturas inclinados com mergulhos para a esquerda sendo que a fratura mais rasa assume também um comportamento sub-horizontal (em 5,4m). Existem ainda certos eventos que num primeiro momento nos leva a pensar em refletores formados por planos de fratura, mas que na verdade são apenas pernas de hipérbolas difratoras.

A figura 06 mostra o radargrama migrado, onde podemos confirmar os dois eventos inclinados, só que a quebra de comportamento do refletor mais raso se dá na posição de 7,0m, e não em 5,4m, conforme visto na secção não migrada.

A secção migrada nos revela um matacão com fraturas inclinadas, indicando que este matacão terá um aproveitamento muito limitado.

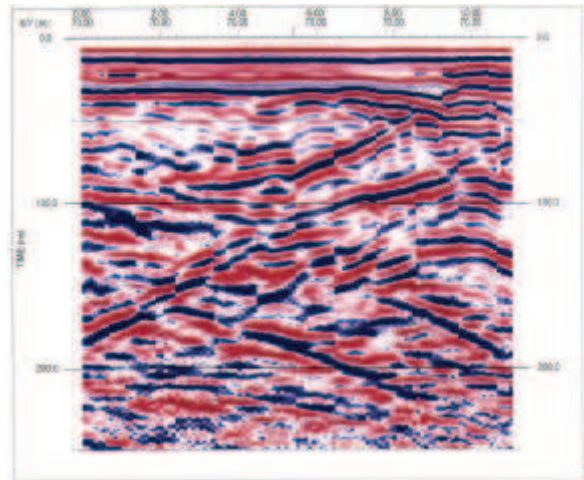


Figura 05: Radargrama 659 levantado sobre um matacão aflorante, registrado com NT=512 amostras, DT=0,5ns e DX=0,1m.

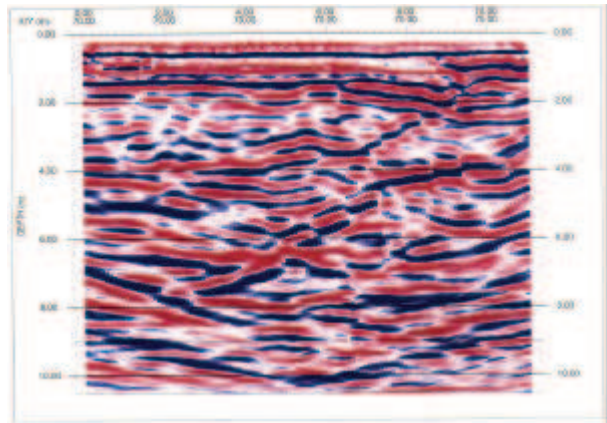


Figura 06: Radargrama 659 migrado com velocidade de 0,095m/ns (Dz=0,05m).

Analisando mais um matacão na área, levantamos o radargrama 661 (Figura 07), onde podemos visualizar refletores inclinados indicativos de planos de fraturas, porém a porção direita superior do radargrama parece estar livre de fraturas e, conseqüentemente, a porção correspondente do matacão poderá fornecer blocos maciços. Para melhor analisar o posicionamento espacial destas fraturas, vamos migrar o radargrama 661.

O radargrama migrado, usando um campo de velocidades plano-paralelo horizontal com $v=0,85\text{m/ns}$ no topo e $v=0,105\text{m/ns}$ na base, é mostrado na figura 08.

Vale observar que o refletor na posição entre 6 e 8 metros abaixo de 100ns na secção não migrada, após o processo de migração vai se situar entre 2 e 4 metros, mergulhando de 4 para 6 metros de profundidade.

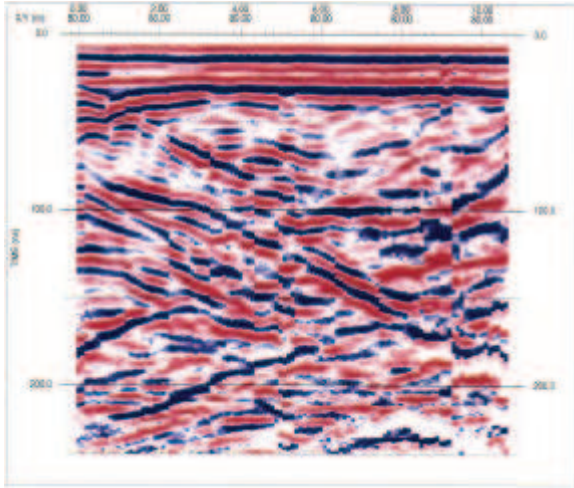


Figura 07: Radargrama 661, registrado com NT=512, DT=0,5ns e DX=0,1m.

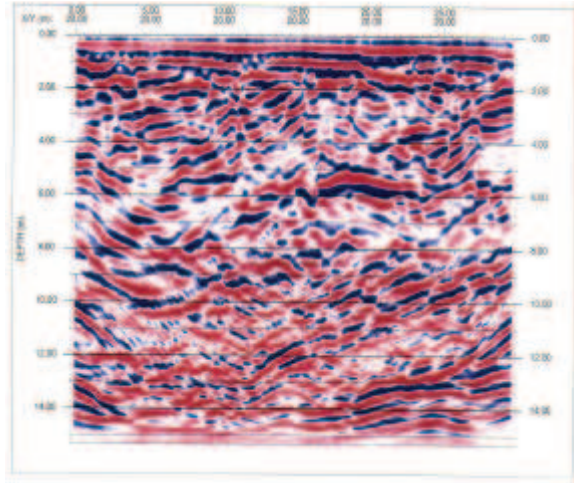


Figura 10: Radargrama 666 migrado em profundidade ($v=0,11$ m/ns) revelando diversos padrões de fraturas e ou descontinuidades, o que indicam não haver homogeneidade para extração de blocos maciços.

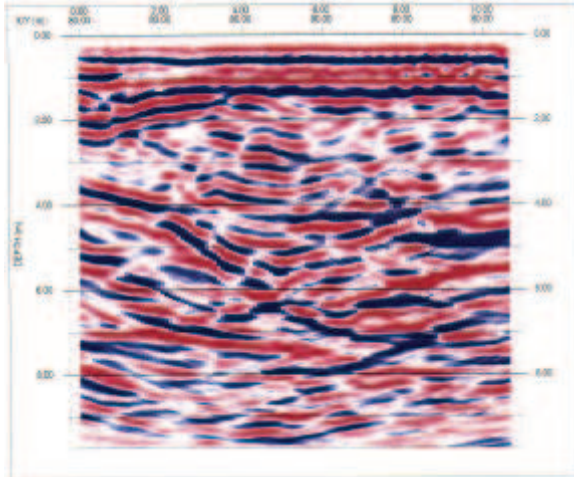


Figura 08: Radargrama 661, migrado em profundidade, usou um campo de velocidade plano-paralelo horizontal com $v=0,85$ m/ns no topo e $v=0,105$ m/ns na base.

O radargrama 666 (figura 09) foi registrado sobre o afloramento de cota mais baixa na área e revelou padrões de refletores inclinados (0 a 15m), refletores horizontais (15 a 25m), entre outras.

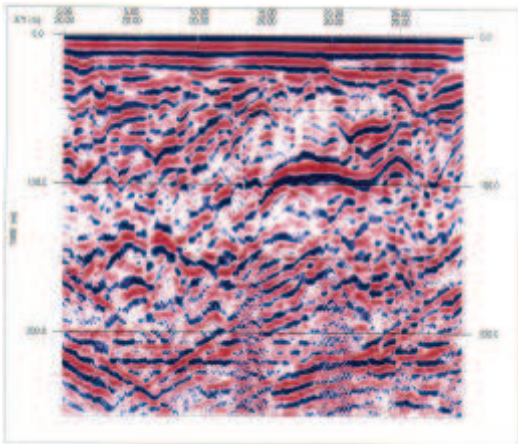


Figura 09: Radargrama 666 sobre o afloramento na cota 20 m, registrado com NT=512, DT=0,5ns e DX=0,1m.

O radargrama foi registrado com uma taxa de amostragem de 0,5 ns, com 512 amostras por "scan" e um espaçamento de 0,1m entre os "scans". Aplicando filtro corta baixa com o limite da janela em 30 MHz, migramos o radargrama para verificar o verdadeiro comportamento espacial dos refletores. A figura (10) mostra o resultado da migração empregando uma velocidade de 0,11m/ns, onde podemos visualizar os mesmos padrões de reflexão já citados. A intensidade e a proximidade entre os refletores atestam a impossibilidade de se retirar matacões neste afloramento.

O radargrama 670 (figura 11) foi levantado subindo a estrada que leva ao afloramento situado na parte mais alta da área, iniciando na encruzilhada com a estrada que leva ao primeiro afloramento (figura 4). Este perfil tem 70m de extensão, o qual foi registrado com um intervalo de 0,1m entre os traços, e uma taxa de amostragem temporal de 0,5ns com 512 amostras por traços.

Na porção mais rasa do radargrama, em tempos inferiores a 50ns, encontramos diversas hipérbolas fracas que indicam rochas envolvidas por material intemperizado, que fornecem velocidades de propagação do pulso eletromagnético da ordem de 0,07m/ns, o que é coerente com o material argiloso intemperizado superficial. As fortes hipérbolas abaixo de 75m correspondem, infelizmente, a reflexões nos afloramentos e troncos de árvores, e não em estruturas de subsuperfície, o que é comprovado pelas velocidades de 0,30m/ns.

Percebe-se ainda um refletor aproximadamente horizontal (40ns) que pode corresponder à base desta camada mais alterada, posto que abaixo dele encontramos velocidades de 0,95m/ns e de $v=0,11$ m/ns. A seção migrada (figura 12) corresponde a um modelo de duas camadas plano-paralelas horizontais com a velocidade da camada superior de 0,07m/ns e inferior a 0,10m/ns.

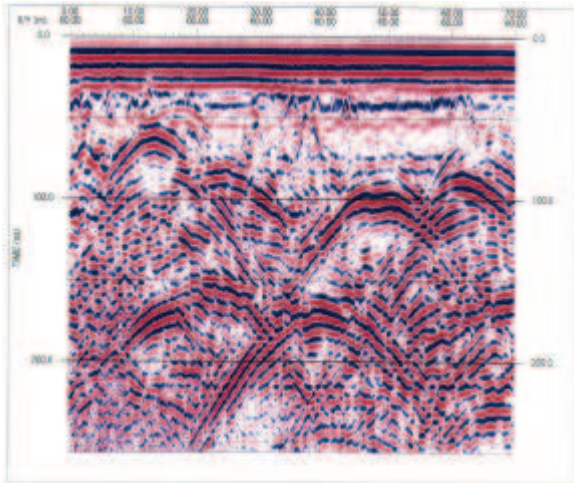


Figura 11: Radargrama 670 levantado com os parâmetros de DT=0,5 ns, NT=512 e DX=0,1 m. As hipérboles curtas superficiais são provenientes de pequenos corpos envolvidos pelo manto de alteração e as fortes hipérboles são reflexões laterais na superfície.

O radargrama 671 continua o trajeto de subida pelo caminho carroçável em direção ao afloramento de cota 60m. Este radargrama também revela uma camada de baixa velocidade correspondente ao material intemperizado, o qual apresenta velocidades entre 0,7 e 0,75m/ns. A presença de corpos rochosos com dimensões mais expressivas (maior que 5 m de diâmetro) cortando esta camada estão evidenciados nas posições de 40 m e entre 58 e 70m. Os parâmetros de registro são idênticos ao do radargrama 670.

Infelizmente, as mesmas reflexões laterais nas árvores mostradas no caso anterior, mascaram as informações do substrato rochoso, embora o radargrama 671 migrado consiga confirmar o posicionamento das descontinuidades (corpos de rochas) na primeira camada.

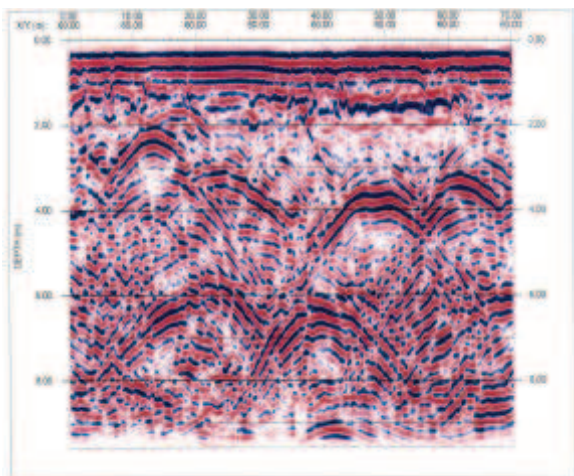


Figura 12: Radargrama 670 migrado usando $Z=0,05$ m e o modelo de duas camadas com velocidades de 0,07 m/ns e 0,1 m/ns.

Após analisarmos diversos radargramas, alguns mostrados anteriormente, podemos concluir que o pulso de GPR é fortemente atenuado no material intemperizado que circunda os matacões, o que torna muito difícil visualizar estes corpos rochosos imersos nesta massa intemperizada, com condutividade muitas vezes superior a 200 mS/m. A atenuação do pulso de radar, e a conseqüente não reflexão de volta à superfície, impede que haja refletores nos radargramas indicando o contorno externo do corpo rochoso, e também qualquer evento oriundo do interior do corpo. Entretanto, o GPR quando aplicado sobre o topo de um matacão que foi decapeado para ser lavrado permite visualizar as fraturas internas a este corpo rochoso revelando sua potencialidade para fornecimento de blocos, antes da lavra propriamente dita.

CONCLUSÃO

Analisando os radargramas registrados no Município de Uruçuca, BA, mostrados anteriormente, podemos concluir que o pulso de GPR é fortemente atenuado no material intemperizado que circunda os contornos destes corpos rochosos imersos na massa intemperizada, a qual apresenta fortes condutividades de até 300mS/m.

O GPR quando aplicado sobre o topo de um matacão que deverá ser lavrado, permite visualizar as fraturas internas deste corpo rochoso revelando sua potencialidade para fornecimento de blocos, antes da lavra propriamente dita. É possível verificar os limites inferiores do corpo rochoso, bem como, as partes livres de fraturas e que apresentam dimensões métricas. Tais partes podem ser usadas para extração de blocos comerciais.

A qualidade, ou melhor, a nitidez dos radargramas registrados sobre os corpos rochosos, pode ser melhorada usando uma seqüência de processamento nos dados GPR, registrados no domínio do afastamento constante, tais como os registrados neste trabalho. Este processamento pode consistir na aplicação de filtro corta baixa (5 a 20MHz) e filtro passa-banda (17 - 110MHz), com posterior aplicações de ganhos (AGC, linear, exponencial, constante) e finalmente, mas principalmente, a aplicação de uma migração.

A técnica de migração usada nesta pesquisa foi a Migração Reversa no Tempo (*Reverse Time Migration*, RTM) bidimensional usando a equação escalar da onda resolvida por operadores de diferenças finitas. Esta poderosa ferramenta foi, na maioria das aplicações, usada com campos de velocidades constantes ou formada por campos de velocidades plano-paralelos, não havendo a necessidade de usar a sua principal virtude que é o preciso desempenho com campos de velocidades complexos.

O trabalho de localização das heterogeneidades que interessam de perto à indústria de rochas ornamentais dever ser feito, obviamente, no domínio do espaço (x,z), portanto a migração é o processo mais importante a ser aplicado nos radargramas (x,t) de modo a atender os interesses da

indústria. A cubagem do material passível de extração na forma de blocos comerciais poderá ser feita após a obtenção do modelo em profundidade (x,z), o qual pode ser obtido tanto pela aplicação de uma migração em profundidade, como a RTM, ou então pela aplicação inicial de uma migração em tempo seguido de uma posterior conversão tempo – profundidade.

Uma extensão natural desta pesquisa é a iluminação do interior do corpo rochoso em estudo, usando processamentos que envolvam aquisição e processamento 3D do conjunto de radargramas registrados, permitindo a obtenção de um modelo (x,y,z) do matacão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F., M. de, Hasui, Y., Neves, B. B. de, and Fuck, R. A., 1977, As províncias estruturais brasileiras, Simpósio de Geologia do Nordeste, v.8, SBG.
- Baysal, E., Kosloff, D., and Sherwood, J. W. C., 1983, Reverse time migration, *Geophysics*, v.48, p. 1514-1524.
- Botelho, M. A. B., e Araújo, F.F., 1996, Emprego do radar para a detecção de fraturas em corpos graníticos, *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia*, v.2, p.391-393, SBG.
- Botelho, M. A. B., Araújo, F.F., e Vicente, H.F., 1996, Detecção de cavernas e estruturas de dissolução em rochas carbonáticas usando radar (GPR), *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia*, v.2, p.388-390.
- Botelho, M. A. B., and Mufti, I. R., 1998, Exploitation of limestone quarries in Brazil with depth migrated ground-penetrating radar data, *Expanded Abstracts of the SEG Meeting*, v.2, p.504-506.
- Botelho, M. A. B., Cerqueira Neto, J.X., e Aranha, P., 1999, Estudo sobre a economicidade de jazidas de rochas ornamentais empregando o geo-radar (GPR), *Anais do VI Congresso Internacional da SBF, V.1*, SBF.
- Claerbout, J. and Doherty, S., 1972, Downward continuation of moveout corrected seismograms, *Geophysics*, v.37, p.741-
- Davis, J. L. and Annan, P., 1989, Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophys. Prosp.*, v.37, 531-551.
- Faria, E. L., 1986, Migração antes do empilhamento utilizando propagação reversa no tempo, *Dissertação de Mestrado*, UFBA.
- Friedel, M. J., Jessop, J. A., and Thill, R. E., 1991, Igneous rock mass fracture delineation using common offset radar reflection, *Expanded Abstracts da SEG*, v.2, p. 504-506.
- Grandjean, G., and Gourry, J. G., 1996, 3D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss, *Journal of Applied Geophysics*, v.36, p.19-30.
- Grasmueck, M., 1996, 3D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss, *Geophysics*, v.61, p.1050-1064.
- Hauser, W., 1970, *Introduction to the principles of electromagnetism*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel, S., and Alford, R. M., 1976, Synthetic seismograms: a finite-difference approach, *Geophysics*, v.41, p. 2-27.
- Loewenthal, D., Lu, L., Roberson, R., and Sherwood, J., 1976, The wave equation applied to migration, *Geophys. Prosp.*, v.24, p.2-27.
- Loewenthal, D. and Mufti, I. R., 1983, Reversed time migration in spatial frequency domain, *Geophysics*, v.48, p.627-635.
- Olhoeft, G.R., 1981, *Electrical properties of rocks*, published by Y. S. Touloukian and C. Y. Ho.
- Parasnis D. S., 1996, *Principles of applied Geophysics*, Chapman and Hall.
- Robert, A., and Bosset, C., 1994, Application du géoradar a la localisation de cavités de nids de gravier et zones karstiques, *Journal of Applied Geophysics*, v.31, p. 197-204.
- Stratton, J.A., 1941, *Electromagnetic Theory*, McGraw-Hill Book Co.
- Sigurdsson, T. and Overgaard, T., 1998, Application of GPR for 3-D visualization of geological and structural variation in a limestone formation, *Journal of Applied Geophysics*, v.40, p. 29-36.
- Yilmaz, O., 1987, *Seismic data processing*, Society of Exploration Geophysicists.
- Silva Filho, M. A. da, Moraes, O., Gil, C. C. A., and Santos, R. A. dos, 1974, *Projeto sul da Bahia, Relatório Final*, v.1, CPRM.